

# 플라즈마 용사용 $Al_2O_3/SS316$ 복합 분말 제조 및 경사 코팅층의 제조에 관한 연구

민재웅\* · 송병길\* · 김삼중\* · 노재승\*\* · 서동수\*

\*충남대학교 공과대학 재료공학과

\*\*금오공과대학교 신소재시스템공학부

## Properties of Plasma Sprayed $Al_2O_3/SS316$ Graded Coatings

Jac-Woong Min\*, Byeong-Gil Song\*, Sam-Joong Kim\*, Jae-Seung Roh\*\* and Dong-Soo Suhr\*

\*Dept. of Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*\*School of Material and System engineering, Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701, Korea

### Abstract

In the case of using high temperature by coating ceramic/metal, large stress was produced due to difference of thermal expansion coefficient between those. And then lead to delamination. In order to relaxation of the stress  $Al_2O_3/SS316$  composite powders with 10wt.% $Al_2O_3$  compositional gradient and 100wt.% $Al_2O_3$  agglomerated powder were made by spray drying method. These powders were sintered to improve the strength and to be plasma sprayed in order to fabricate the FGC(functionally graded coating). The influence of gun power, working distance and Ar pressure on the microstructure of the coating layer was studied in order to optimize the plasma spray conditions. It was proven that the optimum conditions were 40kW gun power, 5cm working distance and 100ft<sup>3</sup>/h Ar flow for both powders. FGC with 10compositional steps was fabricated and the total thickness was 1.3mm. FGC was heat treated at 1100°C for 10hours to evaluate the heat resisting characteristics.

(Received February 19, 2002)

Key Words : FGM, FGC, Functionally graded coatings,  $Al_2O_3/SS316$  Composite powder, Spray drying

## 1. 서 론

1970년대 중반부터 미국의 NASA를 필두로 하여 플라즈마 용사법으로 세라믹 단열 코팅층을 피복시킨 터빈 블레이드가 항공기 가스터빈 엔진의 열효율을 향상시키기 위하여 사용되기 시작하였다. 이후 플라즈마 용사법을 비롯한 다양한 제조공정을 이용한 세라믹 단열 피복(thermal barrier coating, TBC) 기술은 자동차, 선박, 철도, 발전기 등 제반 산업분야에서 확대 응용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 금속 모재에 직접 세라믹 단열 코팅층을 피복한 TBC는 고온에서 사용할 경우에 저온의 냉각면과 현저한 온도차에 의한 열팽창 계수 등 재료의 특성 차이로 인하여 큰 열응력이 발생하고 코팅층과 금속 모재 사이나 코팅층 내부에 균열 발생 및 박리

로 인한 파괴 발생의 취약성이 있다<sup>5)</sup>. 더욱이 세라믹 재료는 소성변형이 일어나지 않고 취성을 나타내기 때문에 급작스런 파괴로 인한 부품 수명의 단축과 신뢰성 저하 문제가 심각하게 대두되고 있다. 최근 세라믹 코팅층과 금속계 코팅층 계면에서 발생하는 열응력을 감소시켜 단열 코팅의 열적 안정성을 향상시키기 위한 방안으로 경사기능재료(functionally graded material, FGM)의 개념을 도입한 경사기능 내열 복합재료(FGM TBC or FGC)의 제작이 활발히 진행되고 있다. 경사기능재료란 특수한 용도에 기능적으로 알맞도록 미세구조, 조성 등이 재료의 위치에 따라 점진적으로 변화하는 재료라고 정의할 수 있다. FGC란 세라믹 top coat/금속계 bond coat 계면에서의 열응력을 완화시키기 위해 세라믹 코팅층과 금속계 결합 코팅층 사이에 세라믹 조성이 0%에서 100%까지 변하는 세라믹/금속

복합층을 삽입한 단일 코팅을 말한다<sup>3)</sup>. 플라즈마 용사법으로 제조한 FGC는 경사기능화에 따라 기존의 TBC보다 단일효과가 더욱 우수하고 열충격, 열피로 특성이 현저히 향상되는 것으로 보고되고 있다<sup>3,4)</sup>.

경사기능 내열 복합재료에 대한 연구는 1980년대에 일본에서 최초로 시도되었으며 현재 일본을 비롯한 선진국에서 초음속 비행기의 구조부와 엔진 부품 등 첨단 기술 부품에 적용하기 위한 고성능 내열, 내화학 재료를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 항공우주 산업이 낙후되어 있어서 초내열, 내화학성을 가지는 경사기능재료에 대한 연구가 선진국에 비하여 상당히 뒤떨어져 있는 실정이다. 따라서 우주시대에 발 맞추어 나아가기 위하여서는 초내열, 내화학 특성을 갖는 경사기능재료의 개발이 필수적이다. 그러므로 경사기능재료의 제조 기술과 함께 코팅층의 열적, 기계적 특성 향상을 위한 설계 및 평가에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

세라믹 분말과 금속 분말의 단일 재료에 대한 용사코팅에 대하여서는 많은 연구자들에 의하여 연구되어 보고되어 있으나<sup>7,8)</sup> 세라믹/금속 복합 분말의 제조에 따른 용사 변수가 코팅층에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 보고되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 경사코팅을 확대 응용하기 위하여 내화학성, 내부식성이 강하고 고온까지 단일상으로 안정한 세라믹 재료인  $Al_2O_3$ 와 금속 재료로는 내부식성이 강하고 가공이 비교적 용이한 SS316을 원료로 하여 분무 건조법으로 10%조성 단계를 갖는  $Al_2O_3/SS316$  복합 분말을 제조하고 분말의 특성이 용사에 적합한지를 측정하여 평가한 다음, 플라즈마 용사법을 이용하여 stainless steel 모재에 경사 코팅층을 형성시켜 열처리 특성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

세라믹/금속 복합 분말을 제조하기 위한 세라믹 분말은 평균입자크기가  $5\mu m$ 의  $Al_2O_3$  분말을 사용하였으며 금속 분말은 평균입자크기가  $15.33\mu m$ 의 SS316 (Praxair 101-3401)을 사용하였다. 이와 같이 입자 크기에 큰 차이를 나타내는 다른 종류의 분말들을 혼합하여 분무 건조할 경우에는 분무 건조된 성구체의 형상이 불규칙하여지고 표면이 거칠어짐으로써 분말의 유동성이 떨어진다. 또한 구성 성분의 분포가 불균일하게 되어 용사용 분말로서 부적합한 분말특성을 갖게 된다. 따라서 입자크기가 큰 SS316 분말을 평균 입자 크기가  $1\mu m$ 이 될 때까지 batch-type attrition mill을 이용하여  $Al_2O_3$  ball로 48시간 동안 습식 분쇄하였다. 입자 크기의 분석은 레이저 입도 분석기(Laser Particle Size

Analyzer, Fritsch Co.)를 사용하였다. 분말을 분쇄할 때에는 금속의 수화 및 산화를 방지하기 위하여 고순도(99.9%)의 에틸알코올을 사용하였다. 습식 분쇄된 두 종류의 분말을 10wt.% $Al_2O_3$ 의 조성단계를 갖도록 평량하여 10~100wt.% $Al_2O_3$ 의 슬러리를 제조하였으며 결합제로 3% PVA를 사용하였다. 준비된 슬러리를 Table 1의 조건으로 분무 건조하여 10종의 복합 조립 분말을 제조하였다. 플라즈마 용사에서 사용되고 있는 세라믹스 용사 분말은 일반적으로 40~100 $\mu m$  범위의 입도 분포를 갖는다. 따라서 본 연구에서도 분무 건조된 분말을 325mesh와 140mesh의 체로 분급을 하여 44~106 $\mu m$ 의 입도 분포를 갖도록 분말을 채취하였다. 분무 건조 상태의 복합 분말은 결합력이 약하여 플라즈마 용사과정 중에 고속의 플라즈마 화염에 의하여 파괴되어 플라즈마 화염층으로 원활히 혼입되지 않아 용사 효율을 떨어뜨리고 불균일한 용사층의 미세구조를 형성시키기 때문에 복합 분말의 강도를 향상시키기 위하여 1000 $^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 Ar 가스의 불활성 분위기에서 소결 열처리하였다. 100% $Al_2O_3$  조립 분말은 1100 $^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 대기중에서 열처리하였다.

**Table 1** Spray drying parameters for fabrication of composite powder

Parameter	Value
Atomizer	Disc type
RPM	8000
Inlet air temperature	200 $^{\circ}C$
Outlet air temperature	100 $^{\circ}C$
Slurry feed rate	30 ml/min
Solution	Ethylalcohol
Binder	3wt.% PVA solution

분무 건조된 조립 분말의 용사 조건을 알아보기 위하여 30wt.% $Al_2O_3$  복합 분말과 100wt.% $Al_2O_3$  분말을 사용하였으며 Metco MBN-type Arc Plasma Sprayer를 이용하여 Table 2의 용사조건으로 코팅층을 제조하였다. 이때 1차 가스(primary gas)인 Ar의 유량과 용사거리(work distance)를 변수로 하였다. 여기서 1차 가스는 플라즈마 발생과 플라즈마 화염의 세기, 속도 등과 밀접한 관계<sup>9)</sup>가 있기 때문에 화염에 주입된 분말의 용융 및 모재와의 집착성을 좌우하는 인자이다. 규명된 용사조건을 바탕으로 Table 3의 용사조건을 설정하여 분무 건조법으로 제조한 복합 분말을 사용하여 경사 코팅 시편을 제조하였다. 각 코팅 공정에서 모재의 과열을 방지하기 위하여 plasma gun-치구-

**Table 2** Plasma spray parameters for the spray dried composite powders

Parameter	Value	
	30wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Material	30wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100wt.%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Arc current (A)	500	500
Arc voltage (V)	70, 80	70, 80
Ar Gas Flow (ft <sup>3</sup> /h.)	80, 100, 120	100
Work distance (cm)	5, 6, 7	5, 6, 7
Traverse rate (cm/sec.)	4	8
Rotating speed (RPM)	450	600

**Table 3** Plasma spray parameters for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 FGC

Parameter	Value		
	Bond coat	FGC	Ceramic coat
Arc current (A)	500	500	500
Arc voltage (V)	70	80	40
Ar Gas Flow (ft <sup>3</sup> /h.)	150	100	100
Working distance (cm)	10	5	5
Traverse rate (cm/sec.)	8	4	4
Rotating speed (RPM)	600	450	450

공기 냉각 장치의 각도를 약 100° 로 하여 냉각을 하였다.

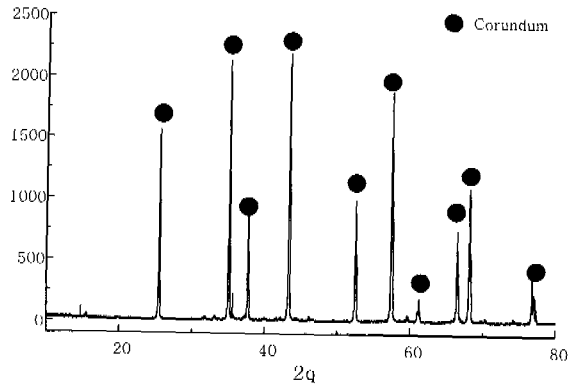
복합 분말은 hall flowmeter(hole size 2mm)로 20g의 복합 분말이 완전히 통과하는 시간을 5회 측정하여 평균한 값으로 유동성을, 광학 현미경으로 미세구조를, XRD로 결정상을 평가하였고, 경사 코팅층의 열적 특성을 시험하기 위하여 1100°C, 10시간 동안 대기 중에서 열처리한 다음 미세구조를 평가하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

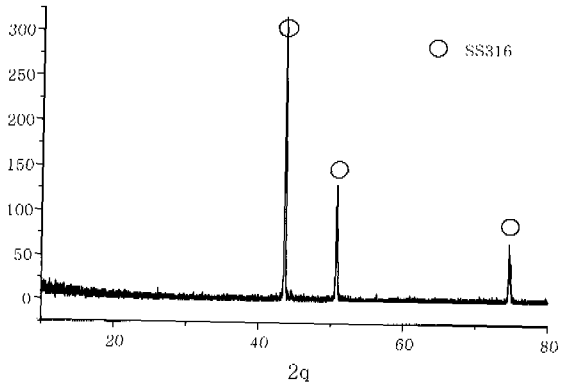
입자 크기가 조대한 원료 분말을 습식 분쇄 후 분쇄된 SS316 분말의 X-선 분석결과는 Fig. 1(c)와 같이 분쇄 매체로 사용한 알루미늄 불의 마모에 의한 코린덤( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 많이 존재함을 알 수 있었다. SS316 분말의 결정상은 원료 분말의 결정상(Fig. 1(b))과 동일하였으나 회절각은 고각도로 전이되었으며 회절선의 폭이 넓어짐을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 분쇄 과정 중 인성이 있는 SS316 분말이 가공 경화되면서 취성이 증가되어 분말이 미세화되고 강한 압축산류응력을

받고 있기 때문이다.

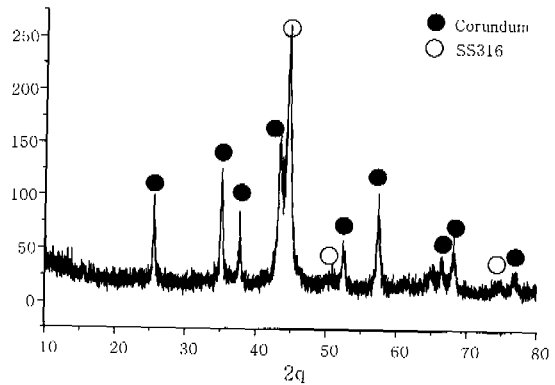
분무 건조된 복합 분말의 입형은 전반적으로 구형을 이루고 있었으며 SEM 사진 분석으로 20~150 $\mu$ m 범위의 입도 분포를 나타내어 체거름으로 44~106 $\mu$ m의 분말을 채취하였다. Fig. 2는 체거름 후 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조성 분포에 따른 조립 분말의 유동도 측정결과로서 약 1.7~2.5sec/g의 양호한 유동도를 나타내었으며 세라믹/금속 조성비는 유동도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 1** XRD results of raw powder and milled metal powder (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b) SS316(Praxair 101 3401) (c) SS316(milled)

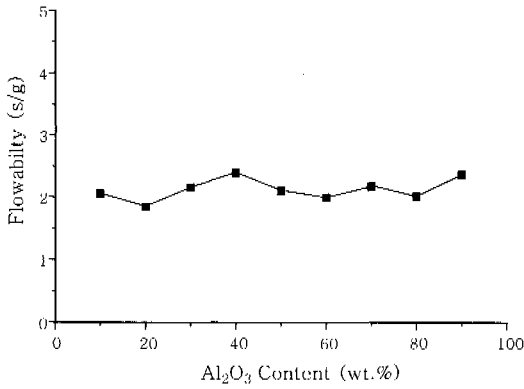


Fig. 2 Flowability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 composite powder depending on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents

Photo. 1은 광학현미경으로 관찰한 복합 분말의 단면 미세구조이다. 분무 건조된 복합 분말의 전반적인 형상은 구형을 이루며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와 SS316 입자가 비교적 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 증가할수록 급속적 팽백을 갖는 입자의 분율이 감소함을 알 수 있다. 급속적 팽백을 갖는 흰색 부분은 SS316 입자로서 분쇄할 때 진단응력에 의한 소성변형으로 인하여 판상의 형태를 이루고 있다. Fig. 2와 Photo. 1에서 보이는 바와 같이 분무 건조법으로 제조된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 복합 조립 분말은 유동도가 양호하며 각 단계별로 조성의 경사가 이루어져 경사 코팅을 위한 용사 분말로 사용이 가능할 것으로 판단되었다.

소결 열처리에 의하여 약간의 소결 수축이 일어났으나 입형과 단계별 조성 경사는 변하지 않았다. Fig. 3는 소결 열처리 후의 XRD 결과로서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 많아질수록 커런덤 회절선의 강도는 커지는 반면 상대적

Photo. 1 Cross-sectional morphology of the spray dried Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 composite powders with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents

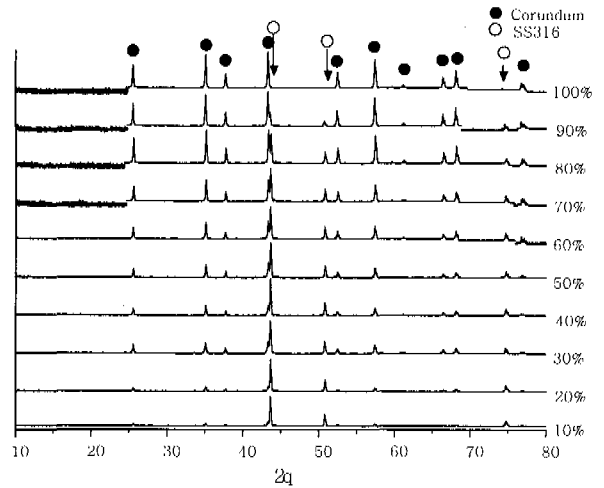
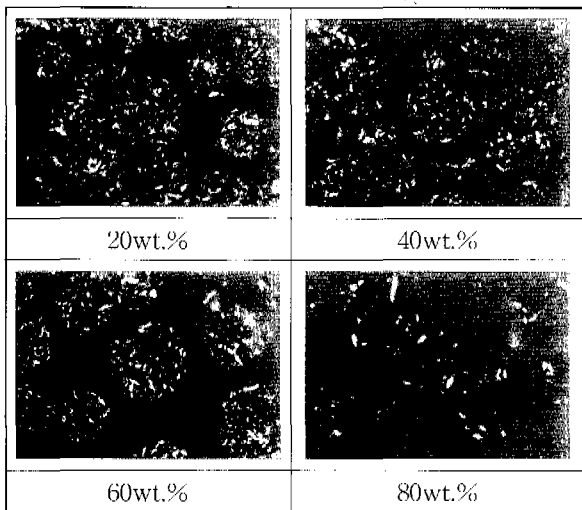


Fig. 3 XRD results for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 composite powder with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents after heat treatment

인 SS316 회절선 강도는 단계별 조성 경사에 따라 감소하였다. 또한 커런덤 회절선과 SS316 회절선 이외의 다른 회절선은 관측되지 않은 것으로 보아 소결 열처리 과정 중에 SS316의 산화에 의한 산화물들이 생성되지 않았음을 확인할 수 있었다.

분무 건조된 세라믹/급속 복합 분말의 플라즈마 용사 조건을 규명하기 위하여 대표적으로 30wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합 분말을 선택하여 Table 2와 같이 출력, Ar 가스 유량 및 용사거리를 변수로 하여 용사된 코팅층의 단면 미세구조는 Photo. 2와 같이 급속적 팽백을 갖는 급속 입자의 분포가 균일하였다. 그러나 급속 입자의 형태는 플라즈마 코팅층에서 일반적으로 나타나는 스플랫(splat)을 형성하지 못하고 구형을 이루고 있다. Ar 가스 유량이 코팅층의 미세구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 출력을 35kW, 용사거리를 5cm로 일정하게 하고 Ar 가스 유량을 80ft<sup>3</sup>/h, 100ft<sup>3</sup>/h 및 120ft<sup>3</sup>/h로 변화시켰을 때, 가스 유량이 증가할수록 코팅층의 두께는 증가하여 용사효율은 좋아짐을 알 수 있었고 코팅층 내에 형성되는 기공 크기도 적어짐을 알 수 있었다. 유량이 증가함에 따라 장입된 분말의 속도가 가속되어 형성되는 스플랫의 두께가 얇아지지만 압력이 낮아지면 일부 분말의 속도가 현저히 떨어져 피사체에 코팅될 수 있는 운동에너지를 갖지 못하여 정착되지 못하는 인자가 큰 때문으로 사료된다. 그런데 120ft<sup>3</sup>/h의 가스 유량에서는 코팅층 내에 많은 균열이 관찰되었다. 이와 같은 균열의 생성은 Ar 가스의 유량이 증가하면 플라즈마 화염의 온도가 상승됨으로써 용융 입자의 과열도가 커지고 급속 모체가 과열된 후 시편의 냉각 과정에서 코팅층과 모체와의 열팽창계수 차이에 의한 열응력이 커지기 때문으로 생각된다. 또한 출력 40kW, 용사 거리 5cm로 일정하게 하고 Ar 가스 유량을 변화

**Photo. 2** Microstructure of plasma sprayed 30wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating depending of primary gas, work distance and gun power

Pri. Gas (Ar)	80ft <sup>3</sup> /h	100ft <sup>3</sup> /h	120ft <sup>3</sup> /h
35kW	W.D.	5cm	
40kW	W.D.	5cm	
		6cm	
		7cm	

시킬 경우에도 유사한 미세구조 변화를 나타내어 Ar 유량이 증가함에 따라 기공 크기는 작아졌으며 120ft<sup>3</sup>/h의 조건에서는 균열이 관찰되었다. 한편 용사 거리의 영향을 고찰하기 위하여 Ar 가스 유량 100ft<sup>3</sup>/h, 출력 40kW로 일정하게 하고 용사 거리를 5cm, 6cm, 7cm로 변화시켰을 때, 용사 거리가 벌어짐에 따라 기공의 크기가 커지고 미세구조가 기공의 발생으로 불균일하여짐을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 플라즈마 화염 온도는 용사 거리가 벌어짐에 따라 플라즈마 화염과 공기가 혼합되면서 급격히 떨어짐으로써 용융 입자가 응고되거나 과열도가 떨어지면서 접성이 낮아져 스플랫(splat) 형성이 불완전하게 되기 때문인 것으로 생각된다. 상기와 같은 미세구조 분석 결과로 세라믹/금속 복합 분말에 대한 플라즈마 용사조건은 가스 유량 100ft<sup>3</sup>/h, 출력 40kW, 용사 거리 5cm의 경우가 가장 양호한 조건으로 판단되어 10wt.% 조성 단계를 갖는 모 든 세라믹/금속 복합 분말의 용사조건으로 설정하였다.

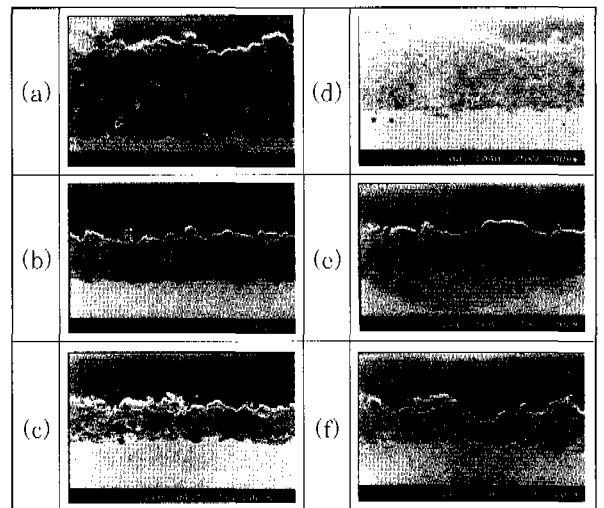
Top 코팅층 형성을 위한 100wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조립 분말의 용사조건을 규명하기 위하여 코팅층의 미세구조에 큰 영향을 미치는 출력과 용사거리에 따른 코팅층의 미세구조 변화를 Photo. 3에 나타내었다. 먼저 출력의 영향을 살펴보면 35kW(Photo. 3(a),(b),(c))의 낮은 출력일 때에는 코팅층 내부에 많은 기공의 존재로 인하

여 불균일한 미세구조를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 출력을 40kW(Photo. 3(d),(e),(f))로 증가시킬 경우에는 기공의 형성 정도로 판단하여 더 치밀하고 균일한 미세구조를 나타내었다. 이와 같은 원인은 분말 공급량을 일정하게 하였을 때 출력이 낮은 35kW의 조건에서는 불충분한 플라즈마 화염온도로 인하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조립 분말이 부분 용융되거나 충분한 과열도를 갖지 못하여 splat 형성이 불완전하여졌기 때문인 것으로 생각된다. 한편 출력을 일정하게 하고 용사 거리를 5cm, 6cm, 7cm로 변화시켰을 때 용사 거리가 벌어질수록 코팅층의 두께가 급격히 감소하였다. 35kW의 경우에는 내부에 형성된 기공 등으로 판단할 때 거리가 멀어지면 용사층의 치밀화에 있어서도 좋지 못함을 알 수 있었다. 이러한 원인은 용사 거리가 멀어지면 플라즈마 화염 온도가 거리에 따라 급격히 떨어지므로 플라즈마 화염내에서 용융되었던 입자들의 과열도가 급속히 떨어지고 재응고되어 접착되지 못하고 튀어나가는 입자들이 많아지기 때문으로 생각된다<sup>6,9)</sup>. 그러나 40kW의 경우에는 미세구조에 있어서 35kW와는 달리 6cm가 좋은 것으로 나타났다. 이것은 플라즈마 화염의 속도가 빨라 거리가 5cm의 경우에는 화염중에 머무는 시간이 6cm보다 적기 때문에 불완전 용융된 분말이 코팅층을 형성하기 때문으로 판단된다. 따라서 분무 건조된 100wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조립 분말의 용사조건은 출력 40kW, 용사거리 6cm에서 가장 바람직한 것으로 판단된다.

Photo. 4(a)는 표 3의 용사조건으로 SS316 모재 위에 접합 코팅층을 두께 50μm 로 형성시키고 10wt.%

**Photo. 3** Microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings

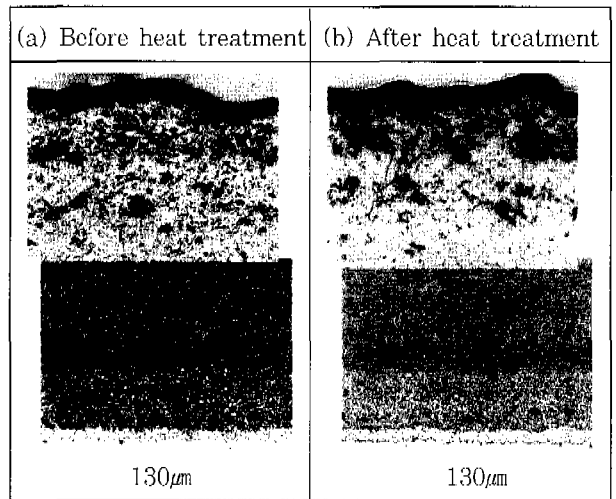
- (a) 35kW, 5cm      (d) 40kW, 5cm
- (b) 35kW, 6cm      (e) 40kW, 6cm
- (c) 35kW, 7cm      (f) 40kW, 7cm



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 조성 경사를 갖는 9종류의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 복합 분말을 순차적으로 형성시킨 다음 100wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 조성을 갖는 top 코팅층을 두께 300 $\mu$ m으로 형성시킨 경사 코팅 시편의 단면 미세구조이다. 조성 경사층은 한 층당 코팅층의 두께를 100 $\mu$ m으로 설정하여 코팅하였다. 금속적 광택을 나타내고 있는 백색부분의 분율이 모재로부터 top 코팅층으로 갈수록 점차적으로 적어지며 조성 단계별 코팅층의 경계가 명확히 구분되지 않은 것을 볼 때 목표로 하였던 조성 구배가 잘 이루어진 것으로 사료된다. 또한 코팅층의 전체 두께는 약 1.3mm(1,300 $\mu$ m)로 매우 두꺼운 코팅층이 형성되었음을 알 수 있다. 플라즈마 용사에 의하여 모재와 박리되지 않고 코팅시킬 수 있는 코팅층의 두께는 모재의 종류와 용사 분말의 종류에 따라 달라지나 일반적으로 코팅층의 두께 한계는 300~500 $\mu$ m 정도이다. 이와 같은 코팅층의 두께 한계는 모재와 코팅층간의 열팽창계수 차이에 의하여 발생하는 응력이 모재와 코팅층간의 접합강도 보다 클 경우에 발생한다. Photo. 4(a)의 미세구조에서는 많은 기공이 존재하나 각 코팅층간에 균열 또는 박리를 관찰할 수 없었으며, 이것은 조성 경사화로 인하여 응력구배가 점차적으로 완화되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 조성 구배가 다른 코팅층 계면에서는 크기가 큰 기공이 형성됨을 관찰할 수 있으며, 이러한 큰 기공의 형성은 용사분말을 교환하는 과정에서 먼저 용사된 코팅층이 냉각됨으로써 스프랫 형성이 불완전하여져 생성된 것으로 판단된다.

경사 코팅된 시편을 1100 $^{\circ}$ C에서 10시간 동안 열처리한 후의 광학현미경 단면 미세구조는 Photo. 4(b)와 같이 용사상태의 시편과 비교하여 금속적 광택을 갖는 스프랫 분율이 열처리 전에 비하여 현저히 감소하였으며 용사상태의 시편에서는 관찰되지 않았던 종방향 균열과 횡방향 균열이 열처리 후에 생성되었다. 이와 같은 균열의 생성은 용사 과정에서 커런담상의 일부가  $\gamma$ 상으로 변환이 되지만 Photo. 4(b)의 열처리한 경우에 top층 내부에 경사층에서 나타나는 균열이 존재하지 않은 것으로 보아  $\gamma$ 상이  $\alpha$ 상으로의 상변화로 인한 균열에의 영향이 적고 주로 코팅층 내에 존재하는 금속의 산화에 의한 부피 팽창과 모재와 코팅층간의 열팽창 차이에 의한 응력이 발생하기 때문으로 생각된다. 그러나 열처리 후에 이러한 균열의 양상에도 불구하고 경사 코팅층의 박리는 일어나지 않았다. 또한 SS316에 경사 코팅에 형성시킨 top Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층의 두께와 같은 두께의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅층의 경우에는 열처리 후에 박리가 일어났음을 확인하였다. 따라서 용사 코팅층의 경사화로 두께

Photo. 4 Microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 functionally graded coating before and after heat treatment



가 두꺼운 용사 코팅층의 제조와 세라믹/금속 간의 열응력의 완화가 충분히 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SS316 경사 코팅을 위한 복합 분말 제조와 플라즈마 용사법을 이용한 경사 코팅층 제조 및 용사층의 특성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무 건조법으로 제조된 복합 조립 분말은 구형의 입형과 양호한 유동성이 지니며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말과 SS316 분말이 균일하게 분포되어 경사 코팅용 용사 분말로의 사용이 가능하였으며 플라즈마 용사된 코팅층은 조성별 경사화가 잘 이루어졌다.
- 2) 분무 건조된 복합 분말의 플라즈마 용사 조건은 Ar 유량 100ft<sup>3</sup>/h, 출력 35kW, 용사 거리 5cm가 가장 양호한 용사 조건으로 판단되었으며 분무 건조된 100wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조립 분말의 용사 조건은 Ar 유량 100 ft/m<sup>3</sup>, 출력 40kW, 용사거리 6cm에서 가장 바람직한 것으로 판단되었다.
- 3) 조성 경사화로 인하여 금속 모재와 세라믹 코팅층간의 열팽창 계수 차이에 의한 응력이 점진적으로 완화되어 균열이나 박리가 발생하지 않는 두께 약 1.3mm의 코팅층을 형성시킬 수 있어 코팅층의 두께 한계를 증대시킬 수 있었다.
- 4) 1100 $^{\circ}$ C, 10시간의 열처리에 의하여 금속의 산화가 발생하고 종방향 균열과 횡방향 균열은 생성되었으나 세라믹 단일 코팅의 경우에는 달리 조성 경사화로 인하여 열응력이 완화된 코팅층의 박리는 일어나지 않았다.

## 후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 (과제 번호 : 1997-001-E00624) 연구비에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Cha-hwan Park, Dong-hyun Oh, Kyung-mox Cho, Ik-Min Park : High Temperature Oxidation Behavior of Plasma Sprayed NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub> Functionally Gradient Thermal Barrier Coating, J. Kor. Inst. Met & Mater, **37(5)**(1999), 570-577
2. Chan Kyung Park, Moon Chul Kim, Tae Heon Kwun : 금속기지 내열 경사기능 복합재료 (FGM), 국방과학연구소 연구보고서, (1998)(in Korean).
3. C. R. C. Lima, R.E. Trevisan: Journal of the Thermal Spray Technology, **6**, (1997)
4. T.W. Clyne, Tsui: The 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials, **129-136** (1994)
5. Jae-Joon Park, Yon-Sik Kim, Joon-Hee Song : 경사기 능성 세라믹/금속 복합재료, Bulletin of the Korean Ceramic Society, **10(1)** (1995), 48-67 (in Korean)
6. Lech Pawlowski : The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, John Wiley & Sons, (1995)
7. Byoung-Hee Kim, Dong Soo Suhr : Characteristic and Adhesive Strength Change by Heat Treatment of the Plasma Sprayed ZrO<sub>2</sub>-Thermal Barrier Coatings (TBC), Korean Journal of Materials Research, **8(6)** (1998), 505-512
8. Dong-Soo Suhr : Plasma Spray된 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅의 상변화, 충남대학교 산업기술연구소 논문집, **3(1)**, (1988), 98-102 (in Korean)
9. Robert B. Heimann : Plasma Spray Coating, VCH Publishers, Inc., New York, NT(USA), (1996)